

0- 770347

На правах рукописи



ЛОБОВ Алексей Иванович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
КИНЕТИКИ НАНО-ДОМЕННЫХ СТРУКТУР В МОНОКРИСТАЛЛАХ
НИОБАТА ЛИТИЯ**

01.04.07. – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2008

Работа выполнена на кафедре компьютерной физики и в лаборатории сегнетоэлектриков отдела оптоэлектроники и полупроводниковой техники НИИ Физики и прикладной математики ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А.М. Горького».

Научный руководитель — доктор физико-математических наук,
профессор Шур Владимир Яковлевич

Официальные оппоненты — доктор физико-математических наук,
с.н.с. Важенин Владимир Александрович

доктор физико-математических наук,
доцент Кострицкий Сергей Михайлович

Ведущая организация — Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург

Защита состоится 27 июня 2008 г. в «13» часов на заседании диссертационного совета Д 212.286.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций при ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А.М. Горького» (620000, г. Екатеринбург, пр. Ленина 51, комн. 248).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А.М. Горького».

Автореферат разослан «27» мая 2008 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000437400

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук

Н.В. Кудреватых

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Основным отличительным свойством сегнетоэлектриков является существование спонтанной поляризации, направление которой может изменяться под действием внешнего электрического поля. Процесс переключения поляризации происходит за счет образования и роста индуцированных полем доменов и может быть рассмотрен как аналог фазового перехода первого рода. Исследование эволюции доменной структуры представляет значительный интерес для изучения общих закономерностей кинетики фазовых превращений, что, несомненно, является важной фундаментальной проблемой в современной физике конденсированного состояния.

Кинетика доменной структуры при переключении поляризации существенно зависит от пространственного распределения электрического поля и степени экранирования деполяризующих полей. Неполное экранирование приводит к существенному изменению механизмов движения доменных стенок и формы растущих доменов [1].

В сильнонеравновесных условиях переключения поляризации, когда экранирование деполяризующего поля полностью неэффективно, наблюдается аномальная кинетика доменной структуры, сопровождаемая одномерным анизотропным ростом нано-доменных цепей. Исследование этого явления представляет особый интерес не только для понимания основных закономерностей кинетики «сверхбыстрых» фазовых превращений, но и как возможный способ создания субмикронных доменных структур. Следует отметить, что экспериментальное исследование нано-доменов сопряжено с необходимостью использования методов выявления и визуализации доменов с высоким пространственным разрешением.

Ниобат лития может быть использован как модельный объект для таких исследований, поскольку является одноосным сегнетоэлектриком со сравнительно простой доменной структурой, которая может быть визуализирована оптическими методами. Вместе с тем, кинетика доменной структуры ниобата лития слабо изучена из-за аномально большого коэрцитивного поля, благодаря которому этот материал долгое время принято было считать «замороженным сегнетоэлектриком».

Практический интерес к исследованию кинетики нано-доменной структуры в монокристаллах ниобата лития обусловлен растущим использованием сегнетоэлектрических нелинейно-оптических монокристаллов с прецизионными периодическими доменными структурами для преобразования длины волны лазерного излучения, управления акустическими и нелинейно-оптическими свойствами, создания волноводов и интегральных оптоэлектронных компонент. Ниобат лития, благодаря рекордно высокому нелинейно-оптическому и электрооптическому коэффициентам и промышленному производству крупных монокристаллов является наиболее перспективным материалом для подобных применений. Естественно, что создание прецизионных доменных структур с заданной геометрией («доменная инженерия») невозможно без понимания особенностей кинетики нано-доменной структуры.

Развитие методов создания стабильных регулярных доменных структур с субмикронными периодами исключительно важно для создания устройств, пред-

назначенных для преобразования длины волны лазерного излучения с использованием эффекта квазифазового синхронизма [2]. Получение регулярных доменных структур с субмикронными периодами является принципиальным достижением, которое позволит реализовать качественно новые возможности при создании фотонных кристаллов.

Целью работы является экспериментальное и теоретическое исследование кинетики формирования нано-доменной структуры в сегнетоэлектриках на примере монокристаллов ниобата лития.

Для реализации поставленной цели были сформулированы следующие основные задачи:

1. Изучить влияние селективного химического травления на нано-доменную структуру сегнетоэлектриков на примере монокристаллов MgO:SLT и CLN .
2. Изучить особенности формы доменов в CLN , образующихся при различном отклонении от равновесных условий переключения, а также эволюцию формы при слиянии изолированных доменов.
3. Исследовать процесс переключения поляризации в результате воздействия импульсного лазерного ИК излучения в MgO:LN .
4. Изучить кинетику самоорганизованного роста нано-доменных цепей в результате воздействия импульсного лазерного ИК излучения в MgO:LN .

Объекты исследования.

Изменение доменной структуры при селективном химическом травлении изучалось в монокристаллах изоморфного LN легированного MgO стехиометрического танталата лития LiTaO_3 (MgO:SLT), обладающего значительно меньшим коэрцитивным полем. Исследования кинетики доменной структуры в пространственно неоднородных полях и в результате воздействия импульсного лазерного излучения проводились в монокристаллах ниобата лития LiNbO_3 (LN): конгруэнтного (CLN) и легированного MgO (MgO:LN). Эти материалы наиболее популярны для нелинейно-оптических и акустических применений.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- На примере MgO:SLT показано, что селективное химическое травление может изменять доменную структуру в сегнетоэлектриках. Предложен новый метод получения информации об индуцированной травлением эволюции доменной структуры с нанометрическим пространственным разрешением.
- Сформулирован новый подход к описанию формы изолированного домена, образующегося при неэффективном экранировании, и к эволюции формы при слиянии нескольких изолированных доменов, в рамках которого удалось объяснить все известные формы доменов и существование стенок с аномальной ориентацией вдоль X -направления.
- Показано, что переключение поляризации в результате облучения LN импульсным лазерным ИК излучением происходит под действием пьезоэлектрического поля во время охлаждения. Наблюдаемые особенности кинетики нано-доменов при неоднородном облучении отнесены за счет неоднородного распределения пьезоэлектрического поля.

- Предложена модель роста цепей нано-доменов при облучении LN лазерным излучением с учетом электростатического взаимодействия и эффекта коррелированного зародышеобразования, которая позволила объяснить кинетику формирования самоорганизованных самоподобных нано-доменных структур.

Практическая значимость. Результаты исследований влияния селективного химического травления могут быть использованы для оптимизации условий выявления нано-доменных структур.

Выявленные особенности эволюции доменов при слиянии и зависимость формы изолированных доменов от эффективности экранирования позволяют создавать двумерные структуры доменов контролируемой формы, что может быть использовано при изготовлении фотонных кристаллов.

Изученный механизм создания нано-доменных структур с заданной геометрией под действием пироэлектрического поля, возникающего в результате воздействия импульса лазерного облучения, открывает новые возможности для развития методов нано-доменной инженерии в сегнетоэлектриках.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Эффект самопроизвольного обратного переключения, индуцированный селективным химическим травлением.
2. Методика анализа рельефа травления, позволяющая получать детальную информацию об эволюции доменной структуры в процессе травления.
3. Роль эффекта детерминированного зародышеобразования при росте изолированного домена и зависимость реализации того или иного сценария эволюции доменной структуры от эффективности экранирования.
4. Формирование короткоживущих X-ориентированных доменных стенок с предельной концентрацией ступеней при слиянии изолированных доменов.
5. Переключение поляризации пироэлектрическим полем, возникающим на стадии охлаждения образца в результате воздействия импульса ИК излучения, и наличие краевого эффекта при неоднородном нагреве.
6. Рост нано-доменных цепей благодаря эффекту коррелированного зародышеобразования, и их электростатическое взаимодействие между собой.

Апробация работы. Основные результаты были представлены на 19 российских и международных конференциях и симпозиумах: EMF'2003, 03-08.08.2003, Cambridge, UK; Scanning Probe Microscopy Int. Workshop – 2004, 02-06.05.2004, Nizhny Novgorod; 8th Int. Symposium on Ferroic Domains and Micro- to Nanoscopic Structures, 24-27.08.2004, Tsukuba, Japan; 17th Int. Symposium on Integrated Ferroelectrics, 17-20.04.2005, Shanghai, China; Materials of Nanophysics and Nanoelectronics Int. Symposium, 25-29.03.2005, Nizhny Novgorod; XVII Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков, 27.06.-01.07.2005, Пенза; 11th Int. Meeting on Ferroelectricity, 05-09.09.2005, Foz do Iguaçu - Puerto Iguazu, Brazil-Argentina; Int. Symposium "Micro- and Nano-scale Domain Structuring in Ferroelectrics", 15-19.11.2005, Ekaterinburg; 8th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity,

15-19.05.2006, Tsukuba, Japan; 9th Int. Symposium on Ferroic Domains and Micro- to Nanoscopic Structures, 26-30.06.2006, Dresden, Germany; 5th Int. Seminar on Ferroelastic Physics, 10-13.09.2006, Voronezh; 8th European Conference on Applications of Polar Dielectrics, 04-08.09.2006, Metz, France; XII Всероссийской конференции "Оптика и спектроскопия конденсированных сред", 01-07.10.2006, Краснодар; 6^{ом} международном семинаре "Нелинейные процессы и проблемы самоорганизации в современном материаловедении", 18-22.10.2006, Астрахань; XI Международном Симпозиуме "Нанофизика и нанoeлектроника", 10-14.03.2007, Нижний Новгород; 19th Int. Symposium on Integrated Ferroelectrics, 08-12.05.2007, Bordeaux, France; 2nd Int. Symposium "Micro- and Nano-scale Domain Structuring in Ferroelectrics", 22-27.08.2007, Ekaterinburg; 11th European Meeting on Ferroelectricity, 03-07.07.2007, Bled, Slovenia; 6й Всероссийской конференции-школе "Нелинейные процессы и проблемы самоорганизации в современном материаловедении (индустрия наносистем и материалы)", 14-20.10.2007, Воронеж.

Публикации и личный вклад автора. Основные результаты исследований опубликованы в 46 печатных работах, из них в 7 статьях во всероссийских и зарубежных реферируемых печатных изданиях. Диссертационная работа выполнена на кафедре компьютерной физики и в лаборатории сегнетоэлектриков отдела оптоэлектроники и полупроводниковой техники НИИ ФПМ Уральского государственного университета им. А.М. Горького в рамках исследований, проводимых при поддержке грантов РФФИ (06-02-08149-офи); РФФИ-НЦНИЛ (05-02-19468); Федерального Агентства по образованию (УР.06.01.441) программы «Университеты России», (48859, 49130, РНП 2.1.1.8272) программы «Развитие научного потенциала высшей школы», CRDF BRHE (гр. ЕК-005-ХI), Федерального Агентства по науке и инновациям (гос. контракт 02.513.11.3128).

Все основные результаты работы были получены лично автором или при его активном участии. Выбор направления исследований, формулировка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем профессором В.Я. Шуром и снс НИИ ФПМ УрГУ Е.Л. Румянцевым. Эксперимент по изучению влияния травления на доменную структуру был выполнен Х. Liu (NIMS, Tsukuba, Japan). Автором был выявлен и объяснен эффект изменения доменной структуры, разработан метод анализа рельефа травления и создано программное обеспечение для изучения кинетики доменов, индуцированной травлением. Переключение матрицей электродов было выполнено К. Gallo (ORC, Southampton University, UK). Визуализация доменов проводилась совместно с с.н.с. НИИ ФПМ УрГУ Д.К. Кузнецовым. Моделирование переключения, анализ и сравнение результатов с экспериментом были выполнены автором. Образование Х-ориентированных доменных стенок было объяснено совместно с научным руководителем. Эксперименты по облучению LN импульсным лазерным излучением и выявление нано-доменных структур проводились совместно с Д.К. Кузнецовым и с.н.с. НИИ ФПМ УрГУ Е.И. Шишкиным. Создание модели переключения под действием пьезоэлектрического поля, анализ результатов моделирования и сравнение с экспериментом были выполнены совместно с научным руководителем. Анализ нано-доменных структур и выявление правил их формирования, создание модели роста цепей взаимодействующих нано-доменов, объяснение их отражения и

ветвления, и сравнение эксперимента с результатами моделирования были выполнены автором.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, и списка цитируемой литературы. Общий объем работы составляет 154 страницы, включая 113 рисунков и библиографию из 155 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы основные цели и задачи работы, определен объект исследований, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Кратко изложены основные научные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации работы, личном вкладе автора, структуре и объеме диссертации.

Первая глава является обзорной. В ней изложены основные свойства сегнетоэлектриков, описаны основные физические свойства монокристаллов LN. Приведен обзор современных представлений о кинетике доменной структуры в электрическом поле, а также методов исследования переключения поляризации. Особое внимание уделено описанию механизмов экранирования деполяризующего поля. Представлен обзор экспериментальных исследований по формированию нано-доменных структур в LN в результате облучения ультрафиолетовым лазером.

Переключение поляризации в сегнетоэлектриках происходит за счет зародышеобразования, движущей силой которого является макроскопическое электрическое поле, усредненное по объему зародыша E_z [3]. Это поле является суперпозицией приложенного поля E_{ex} , деполяризующего поля E_{dep} и полей внешнего E_{scr} и объемного E_b экранирования. Существование собственного поверхностного диэлектрического слоя приводит к тому, что E_{dep} не может быть полностью скомпенсировано за счет быстрого внешнего экранирования [1], в результате чего после завершения внешнего экранирования в объеме существует остаточное деполяризующее поле E_{rd} . Медленные процессы объемного экранирования полностью компенсируют E_{rd} и стабилизируют доменную структуру.

Запаздывание объемного экранирования приводит к отклонению от равновесных условий переключения, которое количественно характеризуют $R = \tau_{scr}/t_s$ - отношением скорости переключения $1/t_s$ и скорости экранирования $1/\tau_{scr}$. Наибольший интерес представляет переключение в неравновесных условиях, при неэффективном экранировании. Переключение в условиях неполного экранирования может сопровождаться коррелированным зародышеобразованием, благодаря наличию максимума переключающего поля перед доменной стенкой на расстоянии равном толщине диэлектрического зазора [4]. При полностью неэффективном экранировании рост доменов путем бокового движения доменных стенок подавлен, и переключение происходит только за счет дискретного переключения, представляющего собой рост ансамбля изолированных нано-доменов. Благодаря эффекту коррелированного зародышеобразования пространственное распределение нано-доменов в образующихся ансамблях упорядоченно.

Для выявления доменной структуры в LN и LT используют метод селективного химического травления, основанный на том, что скорость травления полярной поверхности Z^+ примерно в 1000 раз меньше скорости травления Z^- . Рельеф травления воспроизводит конфигурацию доменной структуры, и может быть визуализирован с помощью оптической микроскопии, или сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) в атомно-силовой моде (АСМ). Визуализация доменов без травления возможна при помощи оптической микроскопии фазового контраста и СЗМ в режиме регистрации пьезоэлектрических сил (ПСМ).

Импульсное облучение LN ультрафиолетовым (УФ) лазером приводит к формированию квазиупорядоченных нано-масштабных доменных структур, состоящих из цепей изолированных нано-доменов. Использование ПСМ для визуализации и локального переключения поляризации позволило утверждать, что это нано-доменные структуры. Было высказано предположение, что причиной образования поверхностных нано-доменных структур является пьезоэлектрическое поле, существующее вблизи поверхности образца после прекращения воздействия импульса лазерного излучения, и продемонстрировано, что коррелированное зародышеобразование играет определяющую роль при их формировании.

Вторая глава является методической и содержит описание методик экспериментов, и характеристики исследуемых образцов.

Изучение селективного химического травления проводилось на пластинах MgO:SLT и CLN толщиной 0.5 мм, вырезанных перпендикулярно оптической оси. Изучаемые образцы делились на две группы.

В образцах первой группы периодическая доменная структура с периодом 8 мкм создавалась приложением электрического поля при помощи нанесенной на Z^+ поверхность металлической полосовой электродной структуры, ориентированной вдоль Y направления, и сплошного жидкого электрода (раствор LiCl) на Z^- поверхности, после чего образец подвергался травлению при 40°C в плавиковой кислоте (HF) в течение 90 минут. В образцах второй группы субмикронная периодическая доменная структура создавалась приложением поля с помощью проводящего зонда СЗМ. Доменная структура выявлялась с помощью травления при комнатной температуре в чистой HF в течение 20 минут. Рельеф травления измерялся при помощи АСМ.

Изучение изменения формы доменов после слияния производилось в LN с двумерной гексагональной доменной структурой, состоящей из шестиугольных доменов, созданной приложением электрического поля с помощью жидкого электрода через маску, созданную фотолитографией на поверхности пластины. Период доменной структуры составлял 20 мкм.

Формирование нано-доменной структуры в результате воздействия импульсов лазерного излучения изучалось в пластинах CLN и MgO:LN толщиной 0.5 и 1 мм. Облучение излучением импульсного лазера инфракрасного (ИК) диапазона производилось в институте электрофизики УрО РАН, Екатеринбург: длина волны $\lambda = 10.6$ мкм, длительность импульса $\tau_p = 200$ мкс, плотность энергии $I = 0.9 - 7$ Дж/см². Нано-доменные структуры выявляли травлением в концентрированной HF при комнатной температуре в течение 15 минут, и визуализировали с помощью оптической микроскопии и АСМ.

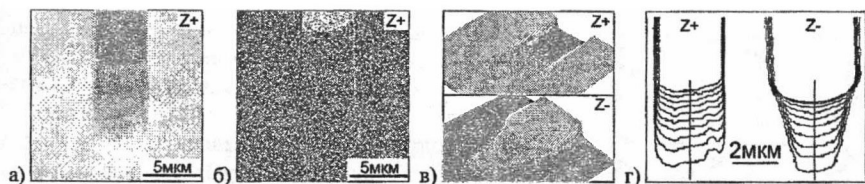


Рис. 1. СЗМ изображения конца полосового домена после травления: а) АСМ, б) РСМ, в) АСМ на Z+ и Z- поверхностях, г) изменение положения доменных стенок на полярных поверхностях с шагом по времени 9 мин. Анализ рельефа травления.

В третьей главе представлены результаты исследований влияния селективного химического травления на доменную структуру.

Принято считать, что селективное химическое травление никогда не изменяет доменную структуру, и рельеф травления однозначно соответствует доменной конфигурации. В работе впервые была показана несостоятельность этого утверждения. Экспериментально обнаружено в монокристаллах MgO:SLT , что при травлении концы полосовых доменов смещаются на десятки микрон относительно первоначального положения. Следует отметить, что в аналогичных условиях полосовая доменная структура в монокристаллах CLN не изменялась.

Установлено в образцах MgO:SLT с периодической полосовой доменной структурой, что измеренный с помощью АСМ рельеф травления концов полосовых доменов представляет собой пологие склоны (Рис. 1а,в). Из изображений, полученных с помощью РСМ после травления (Рис. 1б), было обнаружено, что перемещение стенок продолжалось и после завершения травления.

Для того чтобы исключить возможное влияние пьезоэлектрического поля был проведен контрольный эксперимент, в котором воспроизводились температурные условия цикла травления: нагрев до 40°C , двухчасовая выдержка и охлаждение до комнатной температуры в HNO_3 без добавления HF . РСМ измерения показали, что при такой обработке доменные стенки не смещались, следовательно, переключение обусловлено только травлением.

Была предложена методика анализа рельефа травления, позволяющая восстановить кинетику доменной структуры в процессе травления с высоким пространственным разрешением. В процессе травления скорость удаления вещества с поверхности постоянна и, следовательно, при переключении глубина рельефа каждого фрагмента поверхности пропорциональна времени, в течение которого он представлял собой Z- поверхность. Таким образом, анализ рельефа травления позволяет извлечь информацию о кинетике доменной структуры в процессе травления. На Рис. 1г приведена последовательность положений границы домена на полярных поверхностях с шагом по времени девять минут.

Анализ профилей сечений рельефа (вертикальные линии на Рис. 1г) позволил определить зависимость от времени координат соответствующих участков доменных стенок на полярных поверхностях. Численное дифференцирование позволило получить зависимости от времени скоростей бокового движения доменной стенки в процессе травления (Рис. 2).

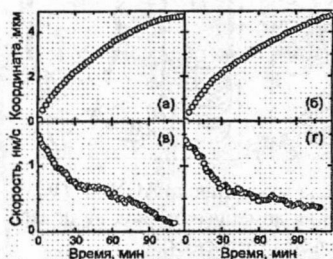


Рис. 2. Зависимости от времени положений и скоростей доменной стенки на полярных поверхностях: (а), (в) на Z^+ , (б), (г) на Z^- .

словлено перераспределением зарядов вблизи полярных поверхностей. Частичное удаление этих зарядов при травлении нарушает условие (1), чему также способствует малая величина E_{th} , не превышающая 1 кВ/мм [5]. Величина E_s при этом определяется соотношением скоростей травления и объемного экранирования.

На рельефе полосового домена, измеренного при помощи АСМ (Рис. 3а), видны ступени, свидетельствующие о скачкообразном смещении конца домена во время травления. Движение конца домена начиналось каждый раз после удаления поверхностного слоя толщиной около 40 нм, что можно отнести за счет удаления доли объемного экранирующего заряда, достаточной для выполнения условия (1). Таким образом, был сделан вывод, что в $MgO:SLT$ экранирование в основном происходит в поверхностном слое толщиной около 40 нм.

Отсутствие в CLN переключения при травлении в тех же экспериментальных условиях отнесено за счет большего порогового поля и объемного экранирования деполаризующих полей за счет ориентации дефектных диполей [5].

При уменьшении размеров доменов роль эффекта индуцированного травлением переключения возрастает. При травлении искусственной нано-доменной структуры с шириной доменов около 300 нм, созданной приложением поля с помощью проводящего зонда СЗМ (Рис. 3б), происходило существенное изменение ширины полосовых доменов по всей площади (Рис. 3в).

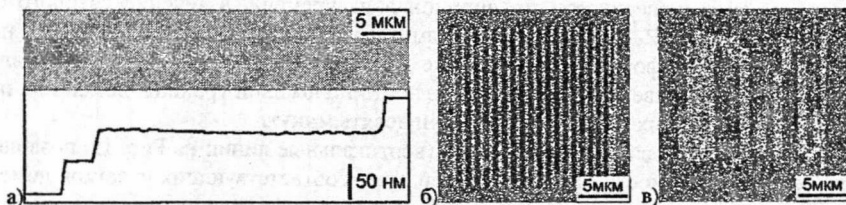


Рис. 3. а) Рельеф травления полосового домена (сверху - АСМ визуализация, снизу - профиль сечения). Искусственная периодическая нано-доменная структура. РСМ визуализация: б) до травления, в) после травления.

Обнаруженное замедление движения стенки аналогично наблюдаемому при переключении в электрическом поле и может быть отнесено за счет запаздывания экранирования.

Индукционное травлением изменение доменной структуры в $MgO:SLT$, можно отнести за счет частичного удаления экранирующего заряда. Доменная структура изменяется, если E_s превышает пороговое поле E_{th} , необходимое для перемещения доменной стенки [4]:

$$E_s = E_{dep} - E_{scr} - E_b > E_{th} \quad (1)$$

В $MgO:SLT$ благодаря высокой объемной проводимости и низкой концентрации объемных дефектов [5] объемное экранирование обусловлено перераспределением зарядов вблизи полярных поверхностей.

Частичное удаление этих зарядов при травлении нарушает условие (1), чему также способствует малая величина E_{th} , не превышающая 1 кВ/мм [5]. Величина E_s при этом определяется соотношением скоростей травления и объемного экранирования.

На рельефе полосового домена, измеренного при помощи АСМ (Рис. 3а), видны ступени, свидетельствующие о скачкообразном смещении конца домена во время травления. Движение конца домена начиналось каждый раз после удаления поверхностного слоя толщиной около 40 нм, что можно отнести за счет удаления доли объемного экранирующего заряда, достаточной для выполнения условия (1). Таким образом, был сделан вывод, что в $MgO:SLT$ экранирование в основном происходит в поверхностном слое толщиной около 40 нм.

Отсутствие в CLN переключения при травлении в тех же экспериментальных условиях отнесено за счет большего порогового поля и объемного экранирования деполаризующих полей за счет ориентации дефектных диполей [5].

При уменьшении размеров доменов роль эффекта индуцированного травлением переключения возрастает. При травлении искусственной нано-доменной структуры с шириной доменов около 300 нм, созданной приложением поля с помощью проводящего зонда СЗМ (Рис. 3б), происходило существенное изменение ширины полосовых доменов по всей площади (Рис. 3в).

Четвертая глава посвящена изучению эволюции формы индивидуальных доменов при переключении поляризации в электрическом поле.

Ранее отмечалось, что в монокристаллах семейства LN экспериментально наблюдается большое разнообразие форм доменов [6]. В главе проведено систематическое объяснение зависимости формы изолированного домена от условий переключения с учетом запаздывания экранирования деполяризующего поля.

Показано, что запаздывание экранирования приводит к замедлению движения доменных стенок (роста доменов) за счет уменьшения вероятности 2D зародышеобразования (генерации ступеней) на стенке. Для изолированного домена в форме многоугольника эффект торможения на вершинах существенно менее выражен, чем на гранях. В результате генерация ступеней происходит только на вершинах. Кроме того, прямые экспериментальные наблюдения показали, что в LN ступени растут только вдоль трех Y кристаллографических направлений. Таким образом наблюдается эффект детерминированного зародышеобразования: рост ступеней, образовавшихся только на трех несмежных вершинах домена (Рис. 4а).

Для детального исследования формы было проведено моделирование роста доменов на гексагональной решетке дискретных элементов, каждый из которых мог существовать в одном из двух состояний с разным знаком P_z . На каждом шаге моделирования для каждого элемента учитывалось состояние шести ближайших соседей. Переключение элемента, не имеющего переключенных соседей, аналогично трехмерному зародышеобразованию (3D), элемента с одним или двумя переключенными соседями - двумерному (2D), а элемента с тремя переключенными соседями - одномерному (1D) (Рис. 4б). Такая модель позволяет детально исследовать послойный рост изолированного домена в условиях детерминированного зародышеобразования. Скорость генерации ступеней пропорциональна вероятности 2D зародышеобразования p_{2D} , а скорость роста ступеней – вероятности 1D зародышеобразования p_{1D} . Форма растущего домена определяется отношением p_{2D}/p_{1D} , которое зависит от степени отклонения от равновесных условий переключения $R = \tau_{scr}/t_s$ за счет неэффективного экранирования деполяризующего поля.

Можно выделить три области неэффективности экранирования: 1) $R \ll 1$ - полное экранирование, 2) $R \sim 1$ - неполное экранирование, 3) $R \gg 1$ - неэффективное экранирование. Моделирование показало, что все разнообразие экспериментально наблюдаемых в LN форм изолированных доменов удастся объяснить как результат изменения p_{2D}/p_{1D} , вызванного изменением неэффективности экранирования.

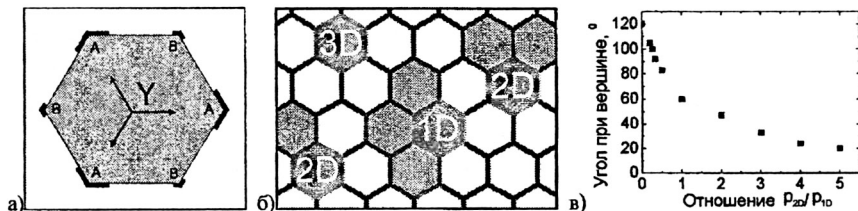


Рис. 4. а) Генерация и рост ступеней, б) типы зародышей, в) зависимость угла при вершине от соотношения вероятностей зародышеобразования (моделирование).

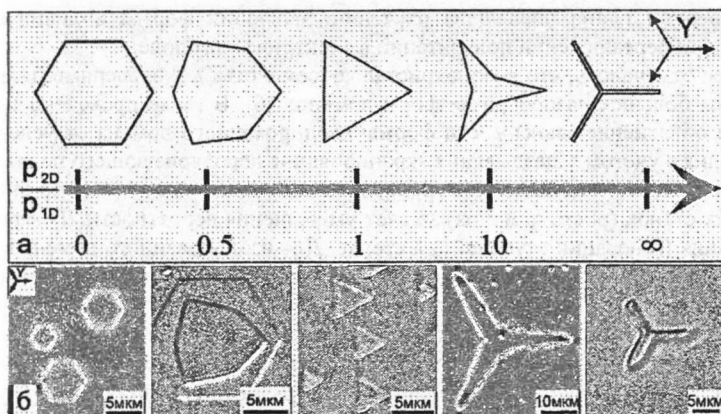


Рис. 5. Зависимость формы изолированных доменов от эффективности экранирования: а) моделирование, б) эксперимент в CLN.

Зависимость величины угла при вершине домена от величины p_{2D}/p_{1D} представлена на Рис. 4в. Видно, что домены в форме правильных шестиугольников, наблюдаются только при полном экранировании, когда концентрация ступеней на доменных стенках мала, и углы при вершинах близки к 120 градусам. Увеличение p_{2D}/p_{1D} приводит к росту концентрации ступеней и уменьшению углов при вершинах, на которых происходит генерация ступеней. Форма доменов при дальнейшем увеличении p_{2D}/p_{1D} изменяется вплоть до трехлучевой звезды и “триплета лучей” (Рис. 5а). Все предсказанные моделью формы доменов были получены экспериментально в CLN при переключении в экспериментальных условиях с различной неэффективностью экранирования, которая определялась изменением скорости переключения и толщины диэлектрического зазора (Рис. 5б).

Следует отметить, что p_{2D}/p_{1D} также может изменяться и в процессе переключения. Моделирование роста домена с учетом уменьшения p_{2D}/p_{1D} позволило объяснить экспериментально наблюдаемое формирование дополнительных граней, что также наблюдалось в эксперименте.

Моделирование позволило объяснить формирование доменов с ориентацией стенок, не соответствующей симметрии кристалла. Было показано, что в результате слияния доменов возникают доменные стенки, ориентированные вдоль X кристаллографических направлений (Рис. 6).

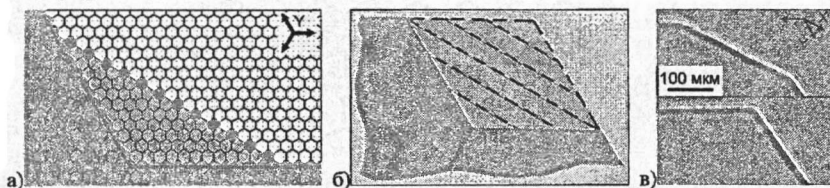


Рис. 6. X-стенка: а) моделирование, б) схема эволюции, в) эксперимент в CLN.

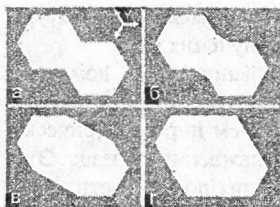


Рис. 7. Эволюция формы домена после слияния.

Как видно на Рис. 6а, на каждом шаге все элементы X -ориентированной стенки имеют три переключенных соседа, и, соответственно, она смещается на каждом шаге моделирования как единое целое. Скорость X -стенки определяется скоростью роста ступени, то есть p_{1D} . Таким образом, X -стенка с максимально возможной концентрацией ступеней перемещается значительно быстрее Y -стенки, поэтому X -стенки имеют короткое время жизни. Длина X -стенки стенки сначала увеличивается после появления, дости-

гает максимального значения, и затем уменьшается вплоть до полного исчезновения (Рис. 6б). Следует отметить, что X -стенки, в отличие от обычных стенок Y -ориентации, движутся плавно без скачков, не взаимодействуя с дефектами.

В общем случае, эволюция формы домена, возникающего после слияния, происходит по следующему сценарию (Рис. 7):

$$(Y)_{\text{вогн}} \Rightarrow (Y + X)_{\text{вогн}} \Rightarrow (Y + X)_{\text{вып}} \Rightarrow (Y)_{\text{вып}} \quad (2)$$

Для изучения форм доменов с X -стенками были экспериментально получены стабильные домены за счет неполного переключения при быстром выключении переключающего поля. Дефекты регулярной двумерной доменной структуры, приводящие к слияниям соседних изолированных доменов, позволили систематически исследовать формы доменов, возникающие при слиянии.

Моделирование позволило показать, что форма домена, существенно зависит от последовательности слияния изолированных доменов. В случае одновременного слияния трех доменов (Рис. 8а,г), все X -ориентированные стенки появляются и растут одновременно, что приводит к формированию правильного девятиугольника. При последовательном слиянии трех доменов одна X -стенка исчезает быстрее других и формируется восьмиугольник (Рис. 8б, д). Такая ситуация значительно чаще реализуется экспериментально.

При слиянии трех доменов может появляться до трех X -ориентированных границ, дополнительных по отношению к обычным Y -ориентированным, что позволяет получать многоугольные домены с числом сторон от 6 до $6Y + 3X = 9$.

Предложенная модель была успешно использована при анализе результатов эксперимента по переключению с помощью двумерной периодической электродной структуры с периодом 20 мкм.

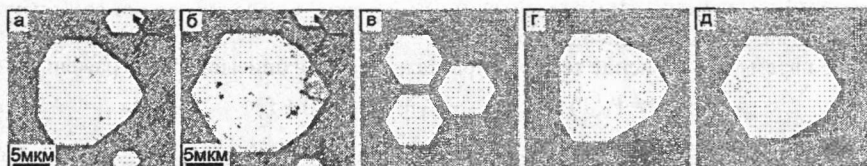


Рис. 8. а, б) домены с X -ориентированными стенками (эксперимент), в) исходное положение трех изолированных доменов, г) результат одновременного слияния доменов, д) результат последовательного слияния доменов.

Пятая глава посвящена изучению возникновения нано-доменных структур в LN в результате воздействия импульсного лазерного ИК излучения.

При анализе полученных ранее результатов по образованию в LN доменных структур после воздействия импульсов УФ лазерного излучения было высказано предположение, что переключение происходит под действием пьезоэлектрического поля E_{pyr} , возникающего при импульсном нагреве и охлаждении образца. Этот механизм был исследован экспериментально путем облучения поверхности образца импульсным ИК лазерным излучением с длиной волны 10,6 мкм для того, чтобы избежать влияния фотоиндуцированной генерации свободных носителей заряда. Был сделан вывод, что переключение обусловлено образованием E_{pyr} , вызванного изменением величины спонтанной поляризации в процессе нагрева и охлаждения при запаздывании экранирования. Изменение пространственного распределения E_{pyr} в цикле нагрев-охлаждение пластины LN в результате воздействия импульса ИК лазерного излучения было детально исследовано с помощью компьютерного моделирования.

Изменение пространственного распределения температуры во времени описывается дифференциальным уравнением температуропроводности:

$$\partial T / \partial t = \alpha(T) (\partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2 + \partial^2 T / \partial z^2) + f(x, t) \quad (3)$$

где ∂t – интервал времени, ∂T – изменение температуры за ∂t в малом элементе объема, $f(x, t)$ – источник тепла (нагрев лазерным излучением), и $\alpha(T) = k(T) / (c_p(T) \cdot \rho)$ – коэффициент температуропроводности, $k(T)$ и $c_p(T)$ – теплопроводность и теплоемкость элемента объема при данной температуре, ρ – плотность LN.

В качестве температурных зависимостей теплопроводности [7], теплоемкости [8], и величины спонтанной поляризации [9] для LN использовались аппроксимации экспериментальных температурных зависимостей соответствующих величин.

Исходная задача является трехмерной, так как при облучении лазерным излучением при диаметре пучка около миллиметра происходит прогрев на глубину около сотни микрон. В предположении, что исходное распределение температуры в облученной зоне является изотропным, изменение распределения температуры со временем моделировалось в рамках двумерной задачи.

Дифференциальное уравнение решалось численно методом конечных разностей для двумерного случая. Для этого образец разделялся на элементарные объемы, $\Delta x = \Delta y = l$ – малая величина (“пространственный дискрет”). Считалось, что масса элементарного объема сосредоточена в точке, и соседние точки соединены стержнями, идеально проводящими тепло.

За время Δt изменение температуры каждой точки описывается выражением:

$$\Delta T = F_0(T) \cdot (T_1 + T_2 + T_3 + T_4 - 4T_0) + f \quad (4)$$

где $F_0(T) = \alpha(T) \cdot (\Delta t / l^2)$ – коэффициент Фурье, T_i – температуры ее ближайших соседей, а f – нагрев от источника тепла.

Расчет для двумерной задачи является корректным, если коэффициент Фурье не превышает 0.25 [10]. Для выполнения этого условия была выбрана величина пространственного дискрета 3.3 мкм и шага по времени 1 мкс.

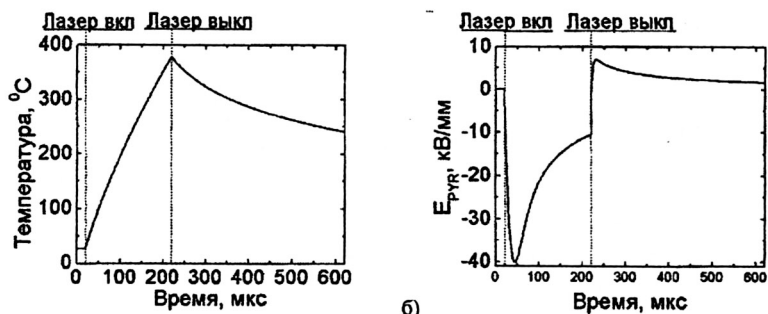


Рис. 9. Изменение а) температуры, б) E_{pyr} на поверхности при воздействии лазерного импульса.

На каждом шаге моделирования вычислялось распределение остаточного деполяризующего поля вблизи поверхности образца, создаваемого некомпенсированными внешним экранированием на данном шаге связанными зарядами, расположенными на полярной поверхности образца.

При расчете внешнего экранирования учитывалась релаксация величины экранирующего заряда в каждом элементе на поверхности образца:

$$\partial Q_{scr}(t)/\partial t = (P_s(t) - Q_{scr}(t)) / \tau_{scr} \quad (5)$$

где τ_{scr} – постоянная времени экранирования.

Предполагалось, что τ_{scr} определяется проводимостью кристалла и поэтому имеет экспоненциальную температурную зависимость [11].

На Рис. 9а,б показаны типичные зависимости от времени T и E_{pyr} на поверхности образца, полученные при моделировании воздействия одиночного импульса ИК излучения с плоским фронтом и плотностью энергии 3 Дж/см² на поверхность образца. Положительные значения E_{pyr} соответствуют переключающему направлению.

Величина и продолжительность существования E_{pyr} зависят от условий облучения и постоянной времени экранирования. Расчеты показали, что при используемых экспериментальных условиях E_{pyr} в LN достигает десятков кВ/мм и затухает на протяжении микросекунд, что является достаточным для роста наблюдаемых нано-доменных структур.

Изучение нано-доменных структур, образующихся в результате облучения LN импульсным лазерным излучением, показало, что каждый нано-доменный луч представляет собой прямую цепь изолированных нано-доменов. Из анализа экспериментально полученных изображений нано-доменных структур было выявлено, что цепь нано-доменов формируется путем пошагового роста, при котором каждый шаг соответствует появлению индивидуального нано-домена. Каждый домен при этом имеет вертикальные стенки с низкой концентрацией заряда, и высокую концентрацию связанных зарядов вблизи вершины (Рис. 10а). Преобразование цепи нано-доменов в сплошной луч происходит при слиянии изолированных нано-доменов.

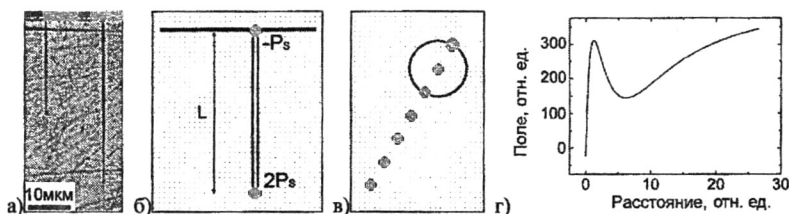


Рис. 10. а) поперечное сечение образца с нано-доменами, б) схема нано-домена в модели (черными кружками показаны точечные заряды на поверхности и в глубине), в) рост нано-доменной цепи путем образования очередного нано-домена, г) пространственное распределение поля на поверхности образца, создаваемого изолированным нано-доменом.

Исходя из этого, для упрощения расчета в модели нано-домен глубиной L заменялся системой из двух зарядов: один на глубине L под поверхностью образца, а второй на полярной поверхности. (Рис. 10б).

При моделировании роста цепи на каждом шаге в пределах некоторого радиуса вокруг каждого из крайних нано-доменов в цепях рассчитывается пространственное распределение поля, создаваемого всеми деполяризующими и экранирующими зарядами. Новые индивидуальные нано-домены появляются в точках с максимальными значениями Z -компоненты переключающего поля Рис. 10в. Экспериментально наблюдаемая анизотропия роста при этом учтена как уменьшение величины подавляющего поля, создаваемого индивидуальным нано-доменом в Y -направлении.

Моделирование показало, что нижний заряд обеспечивает взаимодействие на расстояниях порядка L от изолированного домена, которые достигают десятков микрон, и полярная компонента создаваемого им поля медленно убывает с расстоянием. Для нано-доменной цепи с большой концентрацией нано-доменов, суммарный заряд в глубине оказывает существенное влияние на переключение. Он приводит к взаимодействию доменных цепей, заключающемуся в дискретном повороте растущей нано-доменной цепи при приближении к существующей и в формировании X -ориентированных участков при ветвлении.

Рассчитанное пространственное распределение поля вблизи индивидуального нано-домена (Рис. 10г) демонстрирует максимум на расстоянии близком к толщине диэлектрического зазора, который приводит к эффекту коррелированного зародышеобразования, упорядочивающему распределение нано-доменов в цепи. Таким образом, поверхностные заряды обеспечивают взаимодействие изолированных нано-доменов на расстояниях близких к толщине диэлектрического зазора. Они определяют процесс коррелированного зародышеобразования и обеспечивают прямолинейный рост нано-доменной цепи (Рис. 10в).

Моделирование показало, что изменение глубины нано-доменов приводит к качественному изменению вида траектории отражения. Траектории отражения при глубине 10 мкм имеют острые углы и подобны результату УФ облучения (Рис. 11а,б), а при глубине 100 мкм они становятся более плавными, характерными для случаев облучения ИК излучением (Рис. 11в,г).

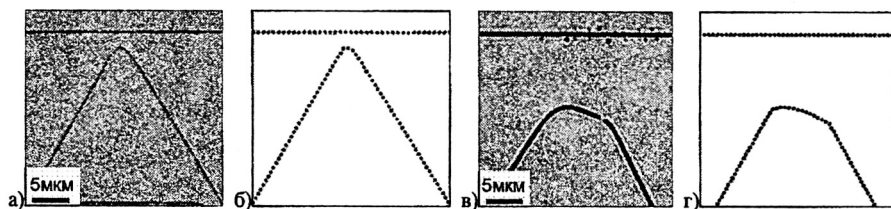


Рис. 11. Траектории отражения, после облучения (а) УФ и (в) ИК лазерами. Оптическая микроскопия после травления. Траектории, полученные при моделировании с глубиной нано-доменов: (б) 10 мкм, (г) 100 мкм.

Таким образом, модель правильно воспроизводит тенденцию к смене вида траекторий отражения при изменении глубины нано-доменов. Следует отметить, что экспериментально измеренные глубины нано-доменов для ИК и УФ облучения так же отличаются примерно в десять раз.

Также проведенные расчеты показали, что зависимость расстояния, на котором происходит поворот при отражении, от толщины диэлектрического зазора, насыщается, а зависимость этого расстояния от глубины изолированных доменов имеет выраженный максимум.

Моделирование было показано, что сильный градиент подавляющего переключение поля вблизи существующей цепи приводит к росту цепи в перпендикулярном существующей цепи X -направлении сразу после ветвления. X -ориентированные участки нано-доменных ветвей в такой ситуации наблюдаются и в моделировании и в эксперименте (Рис. 12ж,з).

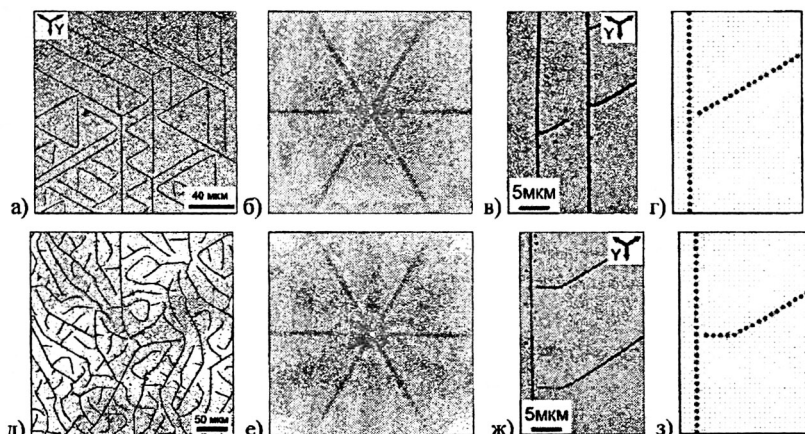


Рис. 12. Возникновение X -ориентированных участков в случае использования ИК излучения, а, д) экспериментальные изображения; б, е) Фурье-образы экспериментальных изображений – дополнительные лучи обусловлены наличием X -ориентированных участков при ветвлениях; изображение ветвления в, ж) в эксперименте, г, з) в моделировании. Верхний ряд изображений соответствует структурам полученным при помощи УФ излучения, нижний – при помощи ИК излучения.

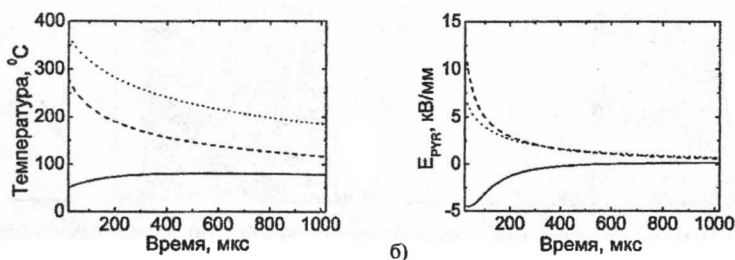


Рис. 13. Зависимость от времени а) температуры и б) E_{pr} вдали от края (точки), на краю (пунктир) и вне поглощающего покрытия (сплошная линия).

При этом расстояние, на котором происходит смена направления роста с X на Y , определяется результатом конкуренции эффектов анизотропии роста, и взаимодействия нано-доменных цепей, и зависит от соотношения глубины нано-доменов и величины анизотропии.

При моделировании пространственно неоднородного нагрева поверхности образца с поглощающим излучение покрытием (Рис. 13а) было обнаружено наличие краевого эффекта.

Полученные при моделировании зависимости от времени переключающего E_{pr} на стадии охлаждения вдали от края покрытия (пунктир) и вблизи края покрытия (точки) после облучения одиночным импульсом ИК лазерного излучения с плотностью энергии 3.5 Дж/см^2 представлены на Рис. 13б. Увеличение E_{pr} на краю вызвано более высокой скоростью охлаждения (Рис. 13а). Показано, что после окончания лазерного импульса вблизи края покрытия существуют максимумы E_{pr} разного знака, направленные в переключающем направлении внутри границ покрытия и в подавляющем переключении направлении – вне покрытия (Рис. 14а). Максимум E_{pr} в подавляющем переключении направлении вызван быстрым нагревом.

Переключение под покрытием дополнительно облегчено уменьшением порогового поля при нагреве (Рис. 14а). В расчете учитывалась наблюдаемая в LN в этом температурном диапазоне экспоненциальная температурная зависимость коэрцитивного поля [12].

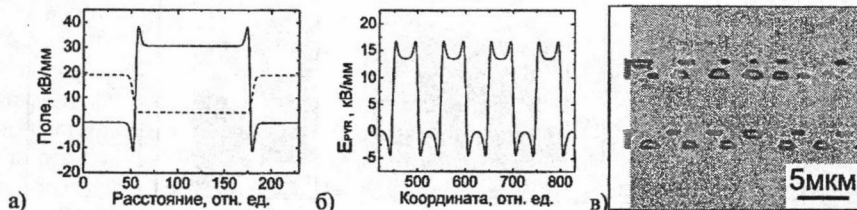


Рис. 14. Пространственное распределение а) порогового поля (пунктир) и E_{pr} (сплошная кривая) через 50 мкс после лазерного импульса, б) E_{pr} под периодическим покрытием. в) Нано-домены при облучении поверхности с периодическим покрытием.

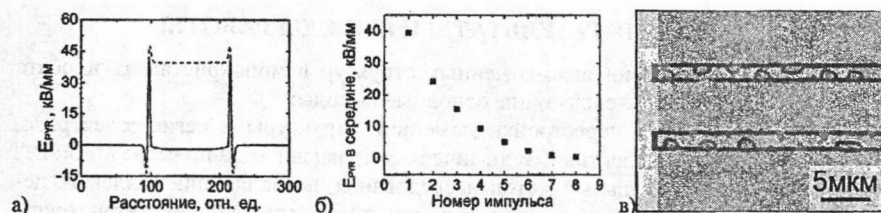


Рис. 15. а); пространственные распределения E_{pyr} через 10 мкс после первого (пунктир) и восьмого (сплошная кривая) импульсов, следующих с интервалом 500 мкс. б) зависимость E_{pyr} под серединой покрытия в зависимости от номера импульса; в) нанодоменная структура, сформировавшаяся под периодическим покрытием после 20 импульсов лазерного излучения.

Моделирование кинетики роста доменной структуры при неоднородном изменении температуры, вызванном импульсным облучением пластины LN с периодическим покрытием (период 7 мкм), показало наличие максимумов поля под краями покрытия (Рис. 14б), что приводит к экспериментально наблюдаемому преимущественному образованию зародышей под краями покрытия (Рис. 14в).

Для объяснения особенностей воздействия серий лазерных импульсов было проведено моделирование облучения образца с периодическим покрытием последовательностью лазерных импульсов длительностью по 50 мкс с интервалами 500 мкс. Пространственные распределения E_{pyr} у поверхности образца под покрытием после окончания первого (пунктир на Рис. 15а) и восьмого импульсов (сплошная кривая на Рис. 15а) показывают, что после первого импульса E_{pyr} вызывает переключение под всей площадью покрытия, а после многократного облучения остаются только максимумы E_{pyr} под краями. Зависимость E_{pyr} после окончания импульса от номера импульса показывает быстрое уменьшение переключающего поля под серединой поглощающего покрытия с ростом числа импульсов (Рис. 15б).

Эта особенность подтверждается экспериментально наблюдаемым увеличением концентрации нано-доменов под краями покрытия при облучении образца серий импульсов и отсутствием разрастания доменов под покрытием (Рис. 15в).

Так же моделирование показало, что при увеличении длительности импульса в диапазоне от 50 до 250 мкс (плотность энергии 5 Дж/см²) максимальные значения переключающего E_{pyr} значительно уменьшаются как вдали от границ, так и на краю покрытия (Рис. 16). Было показано, что при увеличении длительности импульса тепло успевает более однородно перераспределиться в объеме и после окончания импульса образуются меньшие температурные градиенты.

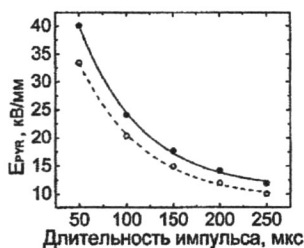


Рис. 16. Максимальные значения E_{pyr} вдали от границ (пунктир) и на краю покрытия (сплошная линия).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

В результате изучения нано-доменных структур в монокристаллах ниобата лития могут быть сделаны следующие основные выводы:

1. Обнаружен эффект перестройки доменной структуры в сегнетоэлектрике, индуцированный селективным химическим травлением на примере MgO:SLT . Предложен оригинальный метод исследования, позволяющий извлекать детальную информацию об эволюции доменной структуры с нанометрическим пространственным разрешением из измеренного рельефа травления.
2. Сформулирован новый подход к описанию формы изолированного домена при неэффективном экранировании деполаризующих полей и эволюции формы при слиянии нескольких изолированных доменов, в рамках которого удалось объяснить все известные формы доменов и существование стенок с аномальной ориентацией.
3. Показано, что переключение поляризации в результате облучения LN импульсным лазерным ИК излучением происходит под действием пирозлектрического поля во время охлаждения. Получено объяснение наблюдаемых краевых эффектов при неоднородном облучении.
4. Предложена модель электростатического взаимодействия цепей нано-доменов, растущих при облучении поверхности образца лазерным излучением с учетом эффекта коррелированного зародышеобразования, которая позволила объяснить кинетику формирования нано-доменных структур, наблюдаемых после облучения.
5. Изученный механизм создания нано-доменных структур с заданной геометрией, под действием пирозлектрического поля в результате воздействия импульса лазерного облучения открывает возможности для развития методов нано-доменной инженерии в сегнетоэлектриках.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 В. Я. Шур, Доменная структура одноосных сегнетоэлектриков и процессы экранирования: Дис. док. физ.-мат. наук, УрГУ, Свердловск, 1990.
- 2 G. Rosenman, A. Skliar, A. Arie, *Ferroelectrics Review*, 1999, V. 1, pp. 263-326.
- 3 V.Ya. Shur, Fast Polarization Reversal Process: Evolution of Ferroelectric Domain Structure in Thin Films // *Ferroelectric thin films: synthesis and basic properties*. - NY: Gordon&Breach, 1996. - Ch.6. - pp. 153 - 192.
- 4 V.Ya. Shur, in *Nucleation Theory and Applications* (WILEY-VCH, Berlin-Weinheim, 2004), Ch.6, 226.
- 5 K. Kitamura, Y. Furukawa, K. Niwa, V. Gopalan, T. Mitchell, *Appl. Phys. Lett.* 73, 3073 (1998).
- 6 X. Zhang, D. Xue, K. Kitamura, *Materials science & engineering. B*, V. 120, pp. 21-26 (2005)
- 7 K. Nassau, M.E. Lines, *J. Appl. Phys.*, 1970, V.41, p.533.
- 8 V. Zhdanova, V. Klyuev, V.V. Lemanov, I.A. Smirnov, V.V. Tikhonov, *Sov. Phys. Solid State*, 1968, V.10, p.1360.
- 9 T. Bartholomaus, K. Buse, C. Deuper, E. Kratzig, *Phys. Stat. Sol. (a)*, 1994, V.K55, p.142.
- 10 В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел, *Теплопередача*, 1975, изд. "Энергия", Москва.
- 11 C.C. Battle, S. Kim, V. Gopalan, K. Barkocy, M.C. Gupta, Q. X. Jia, T. E. Mitchell, *Appl. Phys. Lett.*, 2000, V.76, p.2436.
- 12 H. Ishizuki, I. Shoji, T. Taira, *Appl. Phys. Lett.*, 2003, V.82, p.4062.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. V.Ya. Shur, **A.I. Lobov**, A.G. Shur, S. Kurimura, Y. Nomura, K. Terabe, X.Y. Liu, and K. Kitamura, *Appl. Phys. Lett.*, 2005, V.87, N.2, p.022905.
2. V.Ya. Shur, D.K. Kuznetsov, **A.I. Lobov**, E.V. Nikolaeva, M.A. Dolbilov, A.N. Orlov, and V.V. Osipov, *Ferroelectrics*, 2006, V.341, pp.85-93.
3. **A.I. Lobov**, V.Ya. Shur, I.S. Baturin, E.I. Shishkin, D.K. Kuznetsov, A.G. Shur, M.A. Dolbilov, and K. Gallo, *Ferroelectrics*, 2006, V.341, pp.109-116.
4. V.Ya. Shur, **A.I. Lobov**, A.G. Shur, E.L. Rumyantsev, and K. Gallo, *Ferroelectrics*, 2007, V.360, pp.111-119.
5. V.Ya. Shur, E.L. Rumyantsev, A.G. Shur, **A.I. Lobov**, D.K. Kuznetsov, E.I. Shishkin, E.V. Nikolaeva, M.A. Dolbilov, P.S. Zelenovskiy, K. Gallo, and M.P. De Micheli, *Ferroelectrics*, 2007, V.354, pp.145-157.
6. В.Я. Шур, Д.К. Кузнецов, **А.И. Лобов**, Е.И. Шишкин, П.С. Зеленовский, В.В. Осипов, М.Г. Иванов, А.Н. Орлов, В.В. Платонов, *Известия РАН серия физическая*, 2008, 72, №2, С.198-200.
7. В.Я. Шур, Д.К. Кузнецов, **А.И. Лобов**, Д.В. Пелегов, Е.В. Пелегова, В.В. Осипов, М.Г. Иванов, А.Н. Орлов, *ФТТ*, 2008, 50, №4, С.689-695.

Подписано в печать 21.05.08. Формат 60×84/16
Печать офсетная. Бумага типографская.
Заказ № 64 Усл. печ. л. 0,677 Тираж 100
Уральский государственный университет
620000, г. Екатеринбург, К-83, Ленина, 51
Типолаборатория УрГУ